УДК 621.317.727.1

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ МНОГОДЕКАДНОГО ИНДУКТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В.Л. Ким

Томский политехнический университет
E-mail: sov@camsam.tpu.ru

Предложен аналитический способ расчета случайной погрешности коэффициента передачи многодекадного индуктивного делителя напряжения для области верхних частот с учетом стохастических свойств жгутов. Приведены интервалы погрешностей при доверительной вероятности 0,997.

Индуктивные делители напряжения (ИДН) относятся к одной из функциональных основных групп средств измерений – меры и цифро-аналоговые преобразователи, в том числе многозначные меры [1]. Для ИДН как многозначной меры отношения переменных напряжений в комплексе нормируемых метрологических характеристик важнейшей является динамическая характеристика.

Во многих измерительных системах ИДН работает при гармонических воздействиях. Для установившегося режима, где ИДН представляет собой линейное динамическое звено, наиболее приемлема амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) делителя. Последняя есть зависимость модуля коэффициента передачи ($K_п=U_{вых}/U_{вх}$, где $U_{вых}$ – выходное, а $U_{вх}$ – входное напряжение) от круговой частоты ω входного сигнала. Для генеральной совокупности ИДН, объединяемых понятием "тип ИДН", нормируют номинальную АЧХ и допускаемые отклонения от неё [1].

В общем случае аналитическое представление коэффициента передачи ИДН имеет вид [2]

$$K_п(j\omega)=K_н[1+\gamma_а(\omega)+j\gamma_ф(\omega)],$$

где $K_н$ – номинальный коэффициент передачи; $\gamma_а(\omega)$ и $\gamma_ф(\omega)$ – амплитудная и фазовая составляющие относительной погрешности.

При пренебрежении $\gamma_ф(\omega)$ ввиду малости фазовых сдвигов [3] погрешность коэффициента передачи определяется вещественной составляющей, т.е. $\gamma_а(\omega)$.

В работе [4] проведен расчет амплитудной погрешности однодекадного жгутового ИДН, являющейся для указанного типа делителей случайной величиной. Однако наибольшее применение находят многокаскадные ИДН, поэтому определение их погрешностей является весьма актуальной задачей.

Цель данной статьи – получить аналитическое выражение амплитудной погрешности двухдекадного ИДН с учетом стохастических свойств жгутов.

Среди многокаскадных делителей значительный интерес представляют многодекадные ИДН, в которых каскады выполняются путем намотки двух делительных (декадных) обмоток на одном (общем) ферромагнитном тороидальном сердечнике TV1 (рис. 1). Отводы первой декадной обмотки $L1$ и второй $L2$ коммутируются многопозиционными переключателями $S1$ и $S2$. При таком способе выполнения и соединения декад необходимо, чтобы число витков обмотки $L1$ в десять раз превышало число витков обмотки $L2$. Очевидно, что из-за конструктивных усложнений размещение на общем сердечнике более двух декад нерационально.

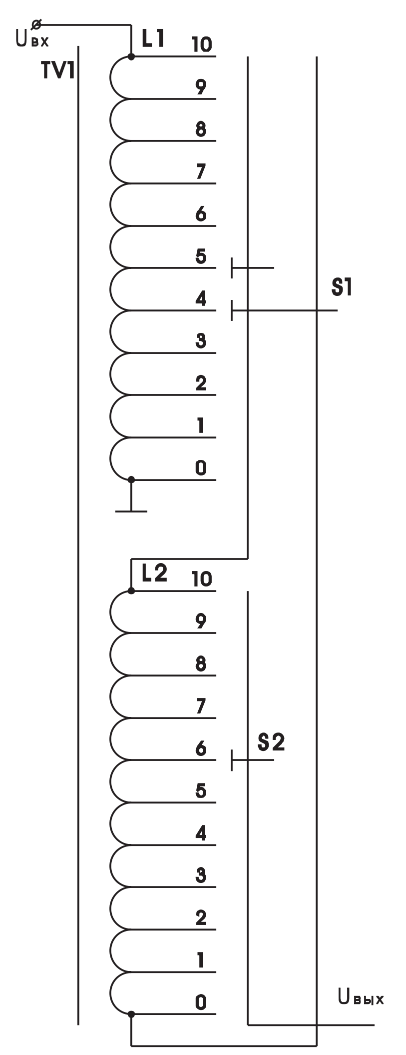


Рис. 1. *Принципиальная схема двухдекадного ИДН*

При преобразовании принципиальной схемы в эквивалентную (рис. 2) учтем, что из-за общего магнитного потока ЭДС второй обмотки равна напряжению секции первой обмотки, т.е. $0{,}1U_{вх}$.

Расчет погрешностей двухдекадного ИДН для нормальных условий применения в областях верхних частот (20...200 кГц) проведем при следующих допущениях:

1. индуктивности и активные сопротивления соединительных проводов и коммутационных элементов равны нулю;
2. емкостные проводимости между обмотками и обмотками и сердечником равны нулю;
3. импеданс нагрузки $Z_н \to \infty$;
4. ЭДС секций в каждой делительной обмотке одинаковы.

Тогда в расчетной схеме (рис. 2) учитываем только индуктивности рассеяния секций первой L_{s1} и второй L_{s2} декад, а также межпроводные емкости жгутов C_1, C_2. Длина жгута второй обмотки в десять раз меньше длины жгута первой обмотки. При одинаковом диаметре проводов жгутов параметры второй декады также будут меньше в десять раз.

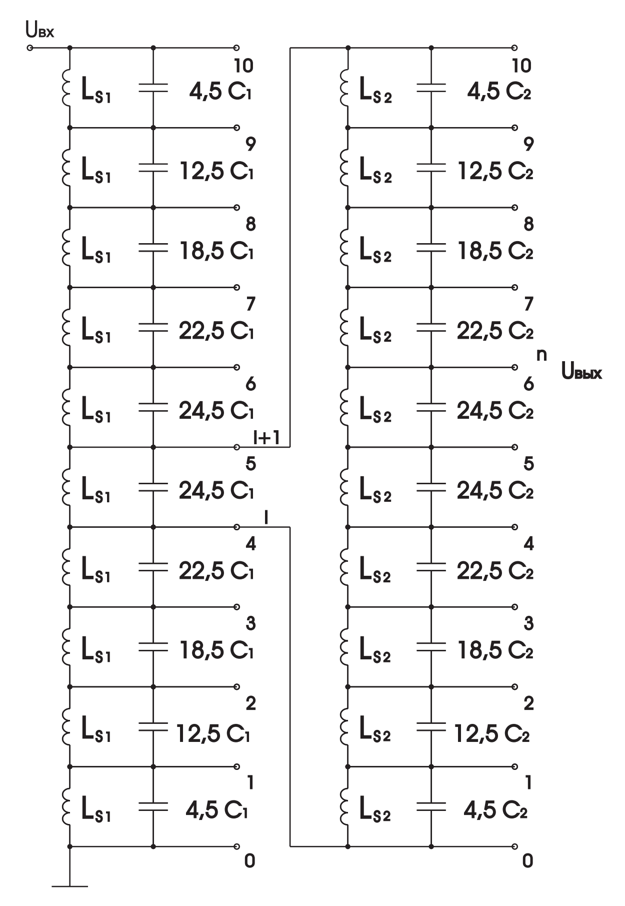


Рис. 2. *Упрощенная эквивалентная схема ИДН*

Следовательно, малая входная емкость второй декады, определяющая входной импеданс этой декады в области верхних частот, практически не оказывает существенного влияния на точность первой декады. В этом случае полагаем, что первая декада работает в ненагруженном режиме. Тогда для расчета напряжений на отводах первой декады можно использовать формулу [4]

$$U_{\text{вых}i} = \frac{L_{2,i}}{L_{1,i} + L_{2,i}} \times$$

$$\times \left[1 + \omega^2 L_{1,i} \left(\frac{L_{2,i}}{L_{1,i} + L_{2,i}} - 1 \right) C_{1,i} + \frac{\omega^2 L_{1,i} L_{2,i}}{L_{1,i} + L_{2,i}} \cdot C_{2,i} \right] U_{\text{вх}},$$

где $i=(\overline{1,10})$ – номер отвода; $L_{1,i}$, $L_{2,i}$ – эквивалентные индуктивности рассеяния и $C_{1,i}$, $C_{2,i}$ – эквивалентные емкости секций, включенных соответственно между отводами i, 10 и 0, i.

Эквивалентные параметры в свою очередь определяются в виде

$$L_{1,i} = \sum_{m=i+1}^{10} L_{s1m}, \quad L_{2i} = \sum_{m=1}^{i} L_{s1m},$$

$$C_{1,i} = (10 - i)^{-2} \sum_{m=i+1}^{10} C_{1m}, \quad C_{2i} = i^{-2} \sum_{m=1}^{i} C_{1m}, \tag{1}$$

где L_{s1m} и C_{1m} – индуктивность рассеяния и шунтирующая емкость m-й секции; $m=(\overline{1,10})$).

Заметим, что параметры второй декады определяются по (1) заменой $L_{s1m}\to L_{s2m}$, $C_{1m}\to C_{2m}$, $i\to n$, где $n=\overline{(1,10)}$ – номер отвода второй декады.

Схемы декад идентичны, поэтому выходное напряжение ИДН, как напряжение на отводе n второй декады относительно отвода 0 первой декады, определяется в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых }i,n} = U_{\text{вых }i} + U_{\text{вых }n} =$$

$$= U_{\text{вх}}\left\{\frac{L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\left[\begin{matrix}1+\omega^2 L_{1,i}\left(\dfrac{L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}-1\right)\times\\ \times C_{1,i}+\dfrac{\omega^2 L_{1,i}L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\cdot C_{2,i}\end{matrix}\right]+\right.$$

$$+\left\{\frac{L_{2,i+1}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\left[\begin{matrix}1+\omega^2 L_{1,i+1}\left(\dfrac{L_{2,i+1}}{L_{1,i}+L_{2,i}}-1\right)\times\\ \times C_{1,i+1}+\dfrac{\omega^2 L_{1,i+1}L_{2,i+1}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\cdot C_{2,i+1}\end{matrix}\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\left[\begin{matrix}1+\omega^2 L_{1,i}\left(\dfrac{L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}-1\right)\times\\ \times C_{1,i}+\dfrac{\omega^2 L_{1,i}L_{2,i}}{L_{1,i}+L_{2,i}}\cdot C_{2,i}\end{matrix}\right]\right\}\frac{L_{2,n}}{L_{1,n}+L_{2,n}}\times$$

$$\left.\times\left[1+\omega^2 L_{1,n}\left(\frac{L_{2,n}}{L_{1,n}+L_{2,n}}-1\right)C_{1,n}+\frac{\omega^2 L_{1,n}L_{2,n}}{L_{1,n}+L_{2,n}}\cdot C_{2,n}\right]\right\}.$$

Из этого выражения после преобразований получаем формулу амплитудной погрешности двухдекадного делителя

$$\gamma_{i,n} = -\omega^2\times$$
$$\times\frac{(9-i)^2(10-i)^{-2}L_{1,i}^2L_{2,i}L_{1,n}+L_{1,i+1}^2L_{2,i+1}L_{2,n}}{(L_{1,i}+L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]}\times$$
$$\times C_{1,i+1}+\omega^2\times$$
$$\times\frac{(i+1)^2 i^{-2}L_{1,i}L_{2,i}^2L_{1,n}+L_{1,i+1}L_{2,i+1}^2L_{2,n}}{(L_{1,i}+L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]}\times$$
$$\times C_{2,i+1}-\omega^2\times$$
$$\times\frac{(10-i)^{-2}L_{1,i}^2L_{2,i}L_{1,n}+i^{-2}L_{1,i}L_{2,i}^2L_{1,n}}{(L_{1,i}+L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]}\times$$
$$\times C_{i+1}-\omega^2\times$$
$$\times\frac{L_{1,n}^2L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})}{10(L_{1,n}+L_{2,n})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]}\times$$
$$\times C_{1,n}+\omega^2\times$$
$$\times\frac{L_{1,n}L_{2,n}^2(L_{1,i}+L_{2,i})}{10(L_{1,n}+L_{2,n})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]}\times \quad (2)$$
$$\times C_{2,n}.$$

Амплитудная погрешность, как следует из (1) и (2), зависит от индуктивностей рассеяния секций и межпроводных емкостей жгутов. Как показано в работах [2, 5] на значения межпроводных емкостей и индуктивностей рассеяния влияет качество изготовления жгута. Несмотря на тщательное скручивание проводов в жгуте, не удается достичь полного выравнивания указанных выше параметров. Разброс параметров жгута и случайная последовательность соединения проводов делительной обмотки обуславливают случайный характер амплитудной погрешности. Заметим, что параметры жгутов отличаются высокой временной и температурной стабильностью. Поэтому полагаем амплитудную погрешность не случайным процессом, а многомерной случайной величиной, зависящей от двадцати индуктивностей рассеяния и двадцати шунтирующих емкостей секций.

Расчет амплитудной погрешности практически не выполним, так как требуется знание совместной функции распределения сорока случайных величин. Очевидно, что решение задачи возможно лишь при некоторых упрощающих допущениях. Воспользуемся, например, критерием существенности случайной составляющей погрешности [1].

Так амплитудную погрешность (2), обусловленную разбросом параметра секции полагаем пренебрежимо малой, если среднее квадратическое отклонение (СКО) параметра не превышает 10 % среднего значения.

В работе [5] приведены результаты исследований различных жгутов, показывающие, что СКО индуктивностей рассеяния не превышает 6 %, тогда как СКО межпроводных емкостей достигает 20 %. Эти данные подтверждены измерениями параметров более 100 жгутов, проведенными автором [4].

Тогда, если не учитывать влияние индуктивности рассеяния, случайная погрешность коэффициента передачи ИДН будет зависеть только от статистических свойств емкости между двумя проводами многопроводного жгута.

В выражении (2) суммирование случайных величин необходимо проводить с учетом степени их коррелированности. Емкости разных жгутов считаем независимыми случайными величинами. В работе [4] показано, что емкости в жгуте являются зависимыми случайными величинами с сильной обратной корреляцией, т.е. с коэффициентами корреляции $R[C_{(\cdot)}C_{(\cdot)}]=-1$.

С учетом этого из (2) получаем следующее выражение для дисперсии амплитудной погрешности

$$D[\gamma_{i,n}] = A_i^2 D[C_{1,i+1}] + B_i^2 D[C_{2,i+1}] +$$
$$+Q_i^2 D[C_{i+1}] - 2A_iB_i\sqrt{D[C_{1,i+1}]D[C_{2,i+1}]} -$$
$$-2A_iQ_i\sqrt{D[C_{1,i+1}]D[C_{i+1}]} -$$
$$-2B_iQ_i\sqrt{D[C_{2,i+1}]D[C_{i+1}]} + S_i^2 D[C_{1,n}] + \quad (3)$$
$$+T_i^2 D[C_{2,n}] - 2S_iT_i\sqrt{D[C_{1,n}]D[C_{2,n}]},$$

где

$$A_i = -\omega^2\cdot\frac{(9-i)^2(10-i)^{-2}L_{1,i}^2L_{2,i}L_{1,n}+L_{1,i+1}^2L_{2,i+1}L_{2,n}}{(L_{1,i}+L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n}+L_{2,n})+0{,}1L_{2,n}(L_{1,i}+L_{2,i})]};$$

$$B_i = \omega^2 \cdot \frac{(i+1)^2 i^{-2} L_{1,i} L_{2,i}^2 L_{1,n} + L_{1,i+1} L_{2,i+1}^2 L_{2,n}}{(L_{1,i} + L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n} + L_{2,n}) + 0{,}1 L_{2,n}(L_{1,i} + L_{2,i})]};$$

$$Q_i = -\omega^2 \cdot \frac{(10-i)^{-2} L_{1,i}^2 L_{2,i} L_{1,n} + i^{-2} L_{1,i} L_{2,i}^2 L_{1,n}}{(L_{1,i} + L_{2,i})[L_{2,i}(L_{1,n} + L_{2,n}) + 0{,}1 L_{2,n}(L_{1,i} + L_{2,i})]};$$

$$S_i = -\omega^2 \cdot \frac{L_{1,n}^2 L_{2,n}(L_{1,i} + L_{2,i})}{10(L_{1,n} + L_{2,n})[L_{2,i}(L_{1,n} + L_{2,n}) + 0{,}1 L_{2,n}(L_{1,i} + L_{2,i})]};$$

$$T_i = \omega^2 \cdot \frac{L_{1,n} L_{2,n}^2 (L_{1,i} + L_{2,i})}{10(L_{1,n} + L_{2,n})[L_{2,i}(L_{1,n} + L_{2,n}) + 0{,}1 L_{2,n}(L_{1,i} + L_{2,i})]}$$

$D[C_{1,i+1}]$, $D[C_{2,i+1}]$, $D[C_{i+1}]$, $D[C_{1,n}]$, $D[C_{2,n}]$ – дисперсии величин $C_{1,i+1}$, $C_{2,i+1}$, C_{i+1}, $C_{1,n}$, $C_{2,n}$.

Далее определяем дисперсии емкостей $D[C_{(\cdot)}]$. Пусть для первой декады среднее значение межпроводных емкостей равно C_1, а дисперсия – $D[C_1]$ для второй декады – C_2 и $D[C_2]$ соответственно. Тогда по методике [4] можно рассчитать дисперсии эквивалентных емкостей для отводов i, n декад. Например, для отвода i=2 из (1) при i:=i+1 находим

$$C_{1,i+1} = C_{1,3} =$$

$$= \frac{1}{7^2}(2 \cdot 22{,}5 + 2 \cdot 24{,}5 + 18{,}5 + 12{,}5 + 4{,}5)\, C_1 = 2{,}64\, C_1;$$

$$C_{2,i+1} = C_{2,3} = \frac{1}{3^2}(4{,}5 + 12{,}5 + 18{,}5) C_1 = 3{,}94 C_1;$$

$$C_{i+1} = C_3 = 18{,}5 C_1.$$

Дисперсии этих емкостей

$$D[C_{1,3}] = D[2{,}64 C_1] = 7 D[C_1];$$

$$D[C_{2,3}] = D[3{,}94 C_1] = 16 D[C_1];$$

$$D[C_3] = D[18{,}5 C_1] = 342 D[C_1].$$

Для n=1 второй декады из (1) при i:=1 получаем

$$C_{1,n} = C_{1,1} = \frac{1}{9^2} \times$$

$$\times \left(2 \cdot 12{,}5 + 2 \cdot 18{,}5 + 2 \cdot 22{,}5 + 2 \cdot 24{,}5 + 4{,}5\right) C_2 = 2 C_2;$$

$$C_{2,n} = C_{2,1} = \frac{1}{1^2} 4{,}5 C_2 = 4{,}5 C_2;$$

$$D[C_{1,1}] = D[2 C_2] = 4 D[C_2];$$

$$D[C_{2,1}] = D[4{,}5 C_2] = 20 D[C_2].$$

Результаты расчетов для других отводов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. *Дисперсии эквивалентных емкостей первой декады*

i	$D[C_{1,i+1}]$	$D[C_{2,i+1}]$	$D[C_{i+1}]$
0	$4D[C_1]$	$20D[C_1]$	$20D[C_1]$
1	$5D[C_1]$	$18D[C_1]$	$156D[C_1]$
2	$7D[C_1]$	$16D[C_1]$	$342D[C_1]$
3	$9D[C_1]$	$13D[C_1]$	$506D[C_1]$
4	$11D[C_1]$	$11D[C_1]$	$600D[C_1]$
5	$13D[C_1]$	$9D[C_1]$	$600D[C_1]$
6	$16D[C_1]$	$7D[C_1]$	$506D[C_1]$
7	$18D[C_1]$	$5D[C_1]$	$342D[C_1]$
8	$20D[C_1]$	$4D[C_1]$	$156D[C_1]$
9	0	$3D[C_1]$	$20D[C_1]$

Числовые характеристики случайной погрешности двухдекадного ИДН определяем для двух случаев: для первой декады ($K_{i,n}$≥0,10) и второй декады ($K_{i,n}$<0,10). Примем также, что L_{s2}=0,1L_{s1}, C_2=0,1C_1. Тогда, например, для коэффициента передачи $K_{i,n}$=0,21, т. е. i=2, n=1 из (2), (3) находим характеристики основной погрешности – математическое ожидание и дисперсию

$$\gamma_{2,1s} = -7{,}5\delta, \ \ D[\gamma_{2,1}] = 760 V^2 \delta^2,$$

где $\delta = \omega^2 L_{s1} C_1, V = \sqrt{D[C_1]} \big/ C_1$ – коэффициент вариации.

Таблица 2. *Дисперсии эквивалентных емкостей второй декады*

n	$D[C_{1,n}]$	$D[C_{2,n}]$
1	$4D[C_2]$	$20D[C_2]$
2	$5D[C_2]$	$18D[C_2]$
3	$7D[C_2]$	$16D[C_2]$
4	$9D[C_2]$	$13D[C_2]$
5	$11D[C_2]$	$11D[C_2]$
6	$13D[C_2]$	$9D[C_2]$
7	$16D[C_2]$	$7D[C_2]$
8	$18D[C_2]$	$5D[C_2]$
9	$20D[C_2]$	$4D[C_2]$

Как показано в [4, 5], погрешность коэффициента передачи ИДН распределена по нормальному закону. Тогда при доверительной вероятности $P_д$ = 0,997 получаем интервальную оценку амплитудной погрешности

$$\gamma_{2,1} = -(7{,}5 \pm 16{,}5)\delta.$$

При расчете первой декады особое внимание уделяем точкам диапазона преобразования (табл. 3), находящимся слева и справа от номинальных значений коэффициента передачи первой декады на расстоянии минимального шага квантования (цены деления) двухдекадного ИДН, т.е. ±0,01.

Проведем анализ данных табл. 3. Во-первых, в точках квантования первой декады, т.е. $K_{i,n}$ = 0,10, 0,20, 0,30, ..., 0,90 границы интервальных оценок погрешностей совпадают с интервалами погрешностей на отводах однодекадного ИДН [4]. Во-вторых, монотонный характер зависимости систематической погрешности $\gamma_{i,ns}$ от коэффициента передачи $K_{i,n}$ не нарушается в точках квантования. В-третьих, изменение разброса амплитудной погрешности в пределах каждого шага квантования происходит скачкообразно, достигая максимального значения в начале и убывая в конце кванта.

Первое обстоятельство подтверждает правомочность предлагаемого подхода к определению случайной погрешности многодекадного ИДН, а второе объясняется меньшим весом второй декады в коэффициенте передачи $K_{i,n}$. Однако, вторая декада, как и первая, имея наибольший разброс погрешностей на своих нижних отводах, трансформирует его в общую погрешность двухдекадного делителя.

Очевидно, что и первая декада влияет на вторую. При установке $K_{i,n}$<0,10 вторая декада подключается к нижним отводам 0 и 1 первой декады. Тогда для расчета погрешностей второй декады формулу (2) преобразуем к виду

Таблица 3. Характеристики случайной погрешности двухдекадного ИДН

Коэффициент передачи, $K_{i,n}$	Математическое Ожидание, $\gamma_{i,ns}$	Дисперсия, $D[\gamma_{i,n}]$	Интервал, $\gamma_{i,n}$
0,10	-12,0δ	400 $V^2\delta^2$	-(12,0±12,0)δ
0,11	-11,2δ	900 $V^2\delta^2$	-(11,2±18,0)δ
0,19	-8,1δ	470 $V^2\delta^2$	-(8,1±13,0)δ
0,20	-8,0δ	460 $V^2\delta^2$	-(8,0±12,8)δ
0,21	-7,5δ	760 $V^2\delta^2$	-(7,5±16,5)δ
0,29	-4,9δ	460 $V^2\delta^2$	-(4,9±12,8)δ
0,30	-4,7δ	440 $V^2\delta^2$	-(4,7±12,6)δ
0,31	-4,3δ	620 $V^2\delta^2$	-(4,3±15,0)δ
0,39	-2,2δ	380 $V^2\delta^2$	-(2,2±11,7)δ
0,40	-2,0δ	370 $V^2\delta^2$	-(2,0±11,5)δ
0,41	-1,8δ	470 $V^2\delta^2$	-(1,8±13,0)δ
0,49	-0,1δ	280 $V^2\delta^2$	-(0,1±10,0)δ
0,50	0	270 $V^2\delta^2$	±9,8δ
0,51	0,1δ	310 $V^2\delta^2$	(0,1±10,6)δ
0,59	1,2δ	170 $V^2\delta^2$	(1,2±7,8)δ
0,60	1,3δ	165 $V^2\delta^2$	(1,3±7,7)δ
0,61	1,4δ	180 $V^2\delta^2$	(1,4±8,0)δ
0,69	1,9δ	88 $V^2\delta^2$	(1,9±5,6)δ
0,70	2,0δ	81 $V^2\delta^2$	(2,0±5,4)δ
0,71	2,0δ	85 $V^2\delta^2$	(2,0±5,5)δ
0,79	2,0δ	33 $V^2\delta^2$	(2,0±3,5)δ
0,80	2,0δ	29 $V^2\delta^2$	(2,0±3,2)δ
0,81	2,0δ	29 $V^2\delta^2$	(2,0±3,2)δ
0,89	1,4δ	7 $V^2\delta^2$	(1,4±1,5)δ
0,90	1,3δ	5 $V^2\delta^2$	(1,3±1,3)δ
0,91	1,2δ	4 $V^2\delta^2$	(1,2±1,2)δ
0,99	0,1δ	0,05 $V^2\delta^2$	(0,1±0,1)δ

$$\gamma_{0,n} = A_0 C_{1,1} + B_0 C_{2,1} + S_n C_{1,n} + T_n C_{2,n},$$

где $A_0 = -10\omega^2 \cdot \dfrac{L_{1,1}^2 L_{2,1}}{L_{1,0}^2}$; $B_0 = 10\omega^2 \cdot \dfrac{L_{1,1} L_{2,1}^2}{L_{1,0}^2}$;

$$S_n = -\omega^2 \cdot \frac{L_{1,n}^2}{L_{1,n} + L_{2,n}}; \quad T_n = \omega^2 \cdot \frac{L_{1,n} L_{2,n}}{L_{1,n} + L_{2,n}}.$$

Дисперсия амплитудной погрешности второй декады

$$D[\gamma_{0,n}] = A_0^2 D[C_{1,1}] + B_0^2 D[C_{2,1}] -$$
$$-2A_0 B_0 \sqrt{D[C_{1,1}] D[C_{2,1}]} + S_n^2 D[C_{1,n}] +$$
$$+T_n^2 D[C_{2,n}] - 2 S_n T_n \sqrt{D[C_{1,n}] D[C_{2,n}]}.$$

В табл. 4 приведены результаты расчетов погрешностей при $P_д = 0,997$ и $V = 0,2$.

Из анализа данных табл. 4 следует важный вывод: интервалы амплитудных погрешностей на всех отводах второй декады одинаковы и полностью определяются характеристиками погрешности первого отвода первой декады, т.е. при $K_{i,n} = 0,10$.

Следует отметить практическую значимость результата расчета второй декады на верхних частотах: повышение точности многодекадных ИДН при малых уровнях выходного напряжения возможно путем уменьшения погрешности на первом отводе первой (старшей) декады, например, емкостной коррекцией, применением новых типов делителей, таких как ИДН с симметрирующей обмоткой [6, 7].

Таблица 4. Характеристики случайной погрешности ИДН при $K_{i,n} < 0,10$

Коэффициент передачи, $K_{0,n}$	Математическое ожидание, $\gamma_{0,ns}$	Дисперсия, $D[\gamma_{0,n}]$	Интервал, $\gamma_{0,n}$
0,01	-12,3δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,3±12,1)δ
0,02	-12,2δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,2±12,1)δ
0,03	-12,2δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,2±12,1)δ
0,04	-12,2δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,2±12,1)δ
0,05	-12,1δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,1±12,1)δ
0,06	-12,1δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,1±12,1)δ
0,07	-12,1δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,1±12,1)δ
0,08	-12,1δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,1±12,1)δ
0,09	-12,1δ	410 $V^2\delta^2$	-(12,1±12,1)δ

Экспериментальные исследования ИДН, проведенные на этапах проектирования и подготовки серийного выпуска таких установок, как В1-20, К2-41, Ф7090, подтвердили достоверность полученных результатов.

Таким образом, предложенный в работе метод расчета амплитудной погрешности как случайной величины применим для расчета многокаскадных ИДН, делительные обмотки которых могут содержать любое число секций с известными распределениями шунтирующих емкостей секций и статистическими характеристиками параметров секций. Аналитические выражения амплитудных погрешностей позволяют выявить степень влияния отдельных каскадов на результирующую случайную погрешность многокаскадного ИДН, нормировать его номинальную АЧХ и допускаемые отклонения от нее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений: Нормативно-технические документы. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 152 с.
2. Байков В.М. Трансформаторные делители напряжения. – М.: Машиностроение, 1984. – 52 с.
3. Ройтман М.С., Калиниченко Н.П. Индуктивные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн. сб. обзоров ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1978. – Вып. 2(14). – С. 24–32.
4. Ким В.Л. Расчет амплитудной погрешности индуктивного делителя напряжения // Измерительная техника. – 2004. – № 3. – С. 28–31.
5. Иыерс Р.Р. Модели и характеристики многопроводного жгута // Труды Таллинского политехнического института. – 1977. – № 432. – С. 77–88.
6. Ким В.Л. Новый способ расширения частотного диапазона индуктивных делителей напряжения // Электричество. – 2003. – № 12. – С. 46–49.
7. Ким В.Л. Индуктивные делители напряжения с симметрирующей обмоткой // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 3. – С. 93–95.